

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2019.05.026

# 米威化饼干二组分食品的等温吸湿特性及模型表征

Moisture sorption isotherm characteristics and the model characterization of two-components in the rice-made wafer

程学雨<sup>1</sup> 钱奕含<sup>1</sup> 卢立新<sup>1,2</sup>

CHENG Xue-yu<sup>1</sup> QIAN Yi-han<sup>1</sup> LU Li-xin<sup>1,2</sup>

(1. 江南大学, 江苏 无锡 214122; 2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122)

(1. Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment & Tehnology, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

**摘要:**在 23, 30, 45 °C 条件下对饼皮、馅料的等温吸湿规律进行静态称重法研究, 同时对试验数据进行常用等温吸湿模型的 Matlab 软件拟合, 得到 3 个温度下的等温吸湿曲线。结果表明: 饼皮、馅料的等温吸湿曲线均为反 S 型, 在一定的水分活度条件下, 随着温度的升高平衡含水率先增加后减少。当水分活度介于 0.35~0.90 时饼皮和馅料最合适的模型分别是 Lewicki 模型和 Peleg 模型, 根据多组分食品等温吸湿特性模型理论获得了表征米威化饼干等温吸湿特性的组合模型。

**关键词:** 多组分食品; 米威化饼干; 平衡含水率; 等温吸湿模型

**Abstract:** The relation between the equilibrium moisture content and the water activity of crust filling at 23, 30 and 45 °C were studied by gravimetric method. The test data were fitted with some typical moisture absorption models by Matlab. The results showed that the moisture isotherm of crust and filling were both S type model. When the moisture activity was constant, the equilibrium moisture content first increase and then decrease with the increase of temperature, which was different from other foods. The Lewicki model and Peleg were the most suitable for fitting adsorption isotherms of crust and filling when the moisture activity was between 0.35 and 0.90. According to the isothermal hygroscopic characteristic model theory of multi-component food, a combined model was developed to characterize the isothermal hygroscopicity of the rice made wafer.

**Keywords:** multi-component; rice made wafer; equilibrium moisture content; moisturesorption model

**基金项目:** 国家重点研发计划课题(编号: 2016YFD0400701)

**作者简介:** 程学雨, 男, 江南大学在读本科生。

**通信作者:** 卢立新(1966—), 男, 江南大学教授, 博导, 博士。

E-mail: lulx21@126.com

**收稿日期:** 2019-02-25

多组分食品应用日益广泛, 组分的多样性会导致吸湿特性产生差异<sup>[1-2]</sup>。研究多组分食品的吸湿特性, 对于多组分食品的防潮、保质等十分重要, 恰当的包装材料、包装技术会为高效的包装设计提供必要信息<sup>[3-4]</sup>。

饼干主要包含以下几种类型: 曲奇饼干、酥性饼干、韧性饼干、夹心饼干、威化饼干等, 其中威化饼干及夹心饼干产品为典型的多组分食品。对于单组分饼干产品, 褚振辉等<sup>[5]</sup>通过静态称重法研究了 23, 30, 45 °C 下, 韧性饼干的等温吸湿曲线为 S 型, 并确定 GAB 模型最适合表征其等温吸湿特性; 王高杰等<sup>[6]</sup>研究了曲奇饼干在水分活度为 0.11~0.92, 不同温度条件下的吸湿平衡含水率变化规律, 并得出 GAB 模型表征曲奇饼干吸湿模型。对于多组分产品, 陈亚慧等<sup>[7]</sup>研究了基于煎饼饼干、果丹皮、琼脂的组合产品的等温吸湿特性, 郝发义等<sup>[8]</sup>基于饼干、凝胶、果丹皮的吸湿特性, 建立了该组合产品的等温吸湿模型。但上述两项研究均是从机理角度出发, 研究对象并非真实的市场销售产品, 截至目前未见关于米威化饼干多组分食品的等温吸湿特性及模型研究的报道。

本试验将二组分食品—米威化饼干及其单组分饼皮、馅料作为研究对象进行等温吸湿试验, 并对试验数据进行常用的等温吸湿模型拟合, 得出最适合表征米威化饼干吸湿特性的模型, 以为米威化饼干等同类的多组分食品防潮保质包装等研究提供技术基础。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 材料

米威化饼干: 主要配料有小麦粉、乳糖、食用植物油、代可可脂巧克力制品、糯米粉、白砂糖、淀粉、乳粉、食品添加剂等, 亿滋食品(北京)有限公司。

### 1.2 主要仪器设备

恒温恒湿试验机: THS-AOC-100AS 型, 庆声科技有

限公司;

电子分析天平:AB204-N型,梅特勒—托利多集团;

电热恒温鼓风干燥箱:DHG-9030A型,上海精宏实验设备有限公司。

1.3 方法

1.3.1 试验条件 试验温度:23, 30, 45 °C;相对湿度:35%, 50%, 60%, 75%, 90%。

1.3.2 平衡含水率的测定 称取质量为10 g左右的新拆包装米威化饼干的单组分饼皮和馅料试样各3份,分别称量盛装试样的洁净带盖玻璃皿的去盖质量,再称量去盖玻璃皿和饼皮(馅料)的总质量;将装有饼皮(馅料)的不加盖玻璃皿全部放入预先设定好温湿度条件的恒温恒湿箱中。经过48 h后,每隔2 h加盖取出玻璃皿,再在电子分析天平中称取其去盖总质量,测量过程中确保时间少于30 s,当连续2次称得的质量数值误差小于0.05% (约0.005 g)时<sup>[9]</sup>,认为饼皮(馅料)的含水量已达平衡,记录总质量。本试验中饼皮和馅料试样一式3份,最终结果取平均值。平衡含水率(以饼皮为例)的计算公式为:

$$X_e = \frac{m_e}{m_i}(X_0 + 1) - 1, \tag{1}$$

式中:

$X_e$  ——干基平衡含水率, g/g;

$m_e$  ——饼皮平衡时的质量, g;

$X_0$  ——干基初始含水率, g/g;

$m_i$  ——饼皮的初始质量, g。

1.4 等温吸湿模型

近年来表征饼干等温吸湿特性模型主要有 Peleg 模型<sup>[10]</sup>、GAB 模型等<sup>[5]</sup>。目前普遍存在3种表征食品平衡含水率与水分活度关系的数学模型:动力学模型、半经验模型和经验模型<sup>[11]</sup>。动力学模型主要包括 BET 模型和 GAB 模型,半经验模型主要包括 Ferro-Fontan 模型和 Halsey 模型等,但还没有任何一种模型可以成功运用于所有食品吸湿特性的表征。

本试验采用目前最常用的5种模型(表1)进行米威化饼干的预表征。

表1 等温吸湿模型

Table 1 Moisture sorption isotherm models

模型	数学表达式
Peleg	$X = A(a_w)^B + C(a_w)^D$
GAB	$X = \frac{WCK a_w}{(1 - K a_w)(1 - K a_w + K C a_w)}$
Lewickil	$X = A \left( \frac{1}{a_w} - 1 \right)^{(B-1)}$
Smith	$X = A - B \ln(1 - a_w)$
Hendenson	$X = \left[ \frac{-\ln(1 - a_w)}{A} \right]^{1/B}$

1.5 数据处理

通过 Matlab 软件编程计算,对饼皮和馅料试验得到的数据使用非线性最小二乘法进行已选择的5种模型数据拟合,得出各个模型的常数。

本试验中采用均方根误差 RMSE、误差平方和 SSE 和决定系数 R-square 对试验数据和模型的拟合效果进行评价。

2 结果与分析

2.1 米威化饼干平衡含水率与水分活度关系

饼皮和馅料吸湿试验数据如图1所示。

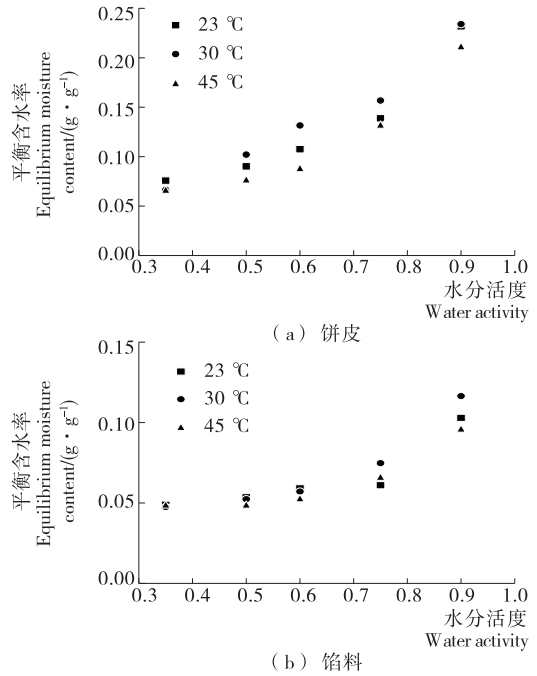


图1 饼皮和馅料吸湿试验数据

Figure 1 Experimental data of filling and crust moisture sorption test

分别用5个模型对23, 30, 45 °C下得到的试验数据进行拟合,由于各温度下5个模型的拟合曲线类似,仅列出23 °C时饼皮和馅料的拟合曲线见图2。

结果表明,在相同温度条件下饼皮和馅料的平衡含水率随水分活度的增加而增加。在3个温度条件下,饼皮和馅料在水分活度介于0.35~0.90时,平衡含水率分别为0.06~0.24, 0.04~0.12 g/g。等温吸湿曲线上均有2个折点,均呈反S型,在吸湿特性曲线中的属于第II种类型。饼皮在水分活度0.35 < a<sub>w</sub> < 0.75时平衡含水率缓慢增加,在水分活度0.75 < a<sub>w</sub> < 0.90时,随着水分活度的增加平衡含水率急剧增加。由于饼皮的主要成分是小麦粉和米粉,前阶段主要受淀粉的影响吸湿缓慢,后阶段主要是受饼皮中所含糖类物质的影响<sup>[12]</sup>,随着含水率的升高糖类物质发生了溶解,增大了和水分子的接触面积,从而提升了饼皮的水分吸附能力<sup>[5]</sup>;馅料在水分活度0.35 < a<sub>w</sub> < 0.60时,平衡含水率缓慢增加,主要是由于馅

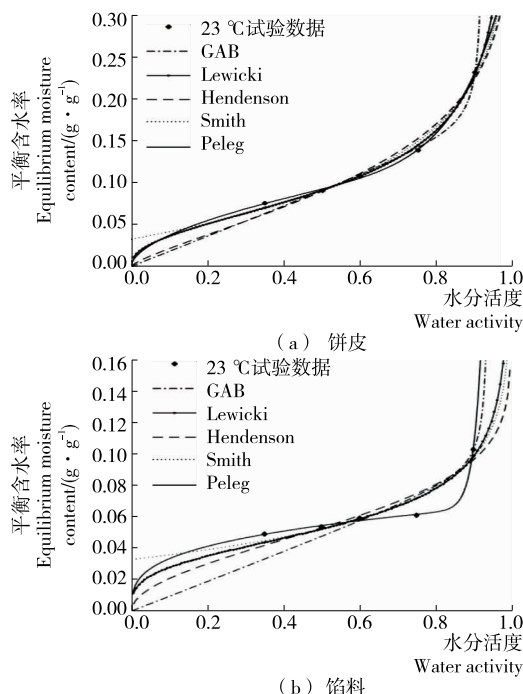


图 2 23 °C 时饼皮和馅料各模型的拟合曲线  
Figure 2 Fitting curves of different models at 23 °C for filling and crust

料中含主要成分是糖及乳制品,对于水分的吸收能力弱<sup>[13]</sup>,在水分活度  $0.60 < a_w < 0.90$  时,馅料中的糖发生溶解,且馅料中的米粉都会使馅料的水分吸附能力增强。

从图 1、2 中可以看出温度介于 23~45 °C 时,随着温度的升高,饼皮和馅料的平衡含水率是先增加后减少的,该结果与目前国内外众多试验结果不同,可能是因为较

低温度 ( $T < 30$  °C) 时,饼皮、馅料中含有大量的糖类物质,随着温度的升高,糖类物质对水的吸收增强,使得饼皮、馅料对水分的吸收能力提高;同时饼皮和馅料间也存在间隙,间隙会相应的吸收水分,最终导致随着温度的升高,平衡含水率增加。在温度介于 30~45 °C 时平衡含水率降低,可能是因为食品中的生物聚合物在水分吸附中起主要作用,一般情况下生物聚合物会随着温度的升高降低对水分的吸附能力<sup>[14][15][12]</sup>;也可能是因为食品的构成成分和组分中糖类物质的溶解性发生改变,当温度上升至一定值后,温度引起物质内部的物理、化学变化而导致了水的亲合活性点减少<sup>[16-17]</sup>。Palipane 等<sup>[18]</sup> 提出水分子的活化能会随着温度升高而提高,在低温情况下平衡含水率会随着温度的降低而升高,这是因为温度越低活化能越低,分子的运动越平和,分子间的吸引力越大,从而使得水分的吸附作用加强;相反,分子的运动会随着温度的增加变得剧烈,降低了水分吸附的能力,故平衡含水率降低。

2.2 饼皮与馅料等温吸湿特性与模型

从表 2 可以看出,对于饼皮而言,在 3 个温度条件下 5 种模型均具有较高的决定系数,在可以接受的范围内,其中 Peleg 模型、Lewicki 模型相对其他模型拟合指标明显较好,拟合效果也很好,Peleg 模型的水分活度适用范围在 0.01~0.85, Lewicki 模型水分活度适用范围在 0.010~0.851,且上述两种模型均适用于小麦面粉<sup>[19-20]</sup>,综合参考 SSE、RMSE 值,故得出饼皮最合适的模型是 Lewicki 模型。

从表 3 可以看出,对于馅料而言,在 3 个温度条件下 5 种模型的评价指标均能很好的体现拟合效果,适于模拟馅料的吸附规律。从评价指标看,Peleg 模型较其他模型

表 2 饼皮在 3 个温度下模型常数及效果评价指标

Table 2 Coefficients and effect evaluation index of different models at 3 temperatures for crust

温度/°C	模型	模型常数				评价指标		
		A(W)	B(K)	C	D	SSE(10 <sup>-5</sup> )	R-square	RMSE
23	Lewicki	0.091	0.578			7.095	0.995 4	0.004 863
	Henderson	16.300	1.310			42.953	0.972 2	0.011 965
	Smith	0.032	-0.084			19.239	0.987 5	0.008 008
	GAB	12.186	1.078	0.013 6		17.580	0.988 6	0.009 375
	Peleg	0.243	7.998	0.135 1	0.560 6	1.034	0.999 3	0.003 215
30	Lewicki	0.103	0.614			35.728	0.977 7	0.010 913
	Henderson	18.391	1.427			16.409	0.989 7	0.007 395
	Smith	0.041	0.085			29.943	0.981 3	0.009 991
	GAB	10.157	1.045	0.018 9		8.993	0.994 4	0.006 705
	Peleg	3.337	42.331	0.219 5	1.097 2	5.825	0.996 3	0.007 632
45	Lewicki	0.079	0.553			9.754	0.993 1	0.005 702
	Henderson	15.786	1.224			31.635	0.977 6	0.010 268
	Smith	0.023	0.080			16.588	0.988 2	0.007 436
	GAB	4.416	1.046	0.033 3		23.445	0.983 4	0.010 827
	Peleg	0.233	4.221	0.062 0	-0.032 1	0.382	0.999 7	0.001 956

表 3 馅料在 3 个温度下的模型常数及效果评价指标

Table 3 Coefficients and fitting evaluation index of different models at 3 temperatures for filling

温度/°C	模型	模型常数				评价指标		
		A(W)	B(K)	C	D	SSE(10 <sup>-5</sup> )	R-square	RMSE
23	Lewicki	0.052	0.712			16.322	0.913 1	0.007 376
	Henderson	255.000	2.011			28.748	0.846 9	0.009 789
	Smith	0.033	0.029			16.223	0.913 6	0.007 353
	GAB	8.478	1.058	0.010 4		44.156	0.764 8	0.014 858
	Peleg	3.638	43.351	0.067 3	0.3036	0.345	0.998 1	0.001 856
30	Lewicki	0.053	0.645			5.282	0.983 3	0.004 196
	Henderson	73.421	1.581			16.771	0.946 9	0.007 476
	Smith	0.026	0.038			6.435	0.979 6	0.004 631
	GAB	16.611	0.929	0.074 6		26.349	0.916 7	0.011 478
	Peleg	0.056	0.162	0.113 6	5.846	0.013	0.999 9	0.000 361
45	Lewicki	0.051	0.723			6.835	0.956 5	0.004 773
	Henderson	308.300	2.066			16.148	0.897 4	0.007 336
	Smith	0.033	0.026			5.702	0.963 7	0.004 360
	GAB	10.852	0.962	0.009 4		36.567	0.767 7	0.013 521
	Peleg	0.087	5.119	0.045 4	-0.067	346.283	0.780 1	0.018 608

具有较高的确定系数且具有较低的误差平方和、均方根误差,拟合效果最好。即水分活度在 0.35~0.90 时,Peleg 模型对馅料的水分吸附过程描述较好,故采用 Peleg 模型作为馅料的等温吸湿特性模型。

2.3 米威化饼干等温吸湿模型

对于多组分食品的等温吸湿模型而言,其组合模型可以通过其单组分的模型方程及各组分的重量在总重量中的占比计算得出<sup>[21]</sup>。对于二组分食品,可以通过先对其单组分进行等温吸湿试验,得出各组分的等温吸湿模型,然后再将该二组分食品放置在一定温湿度条件下进行等温吸湿试验,当该二组分食品达到吸湿平衡后,通过各组分的吸湿模型方程计算出各组分的含水率,再将各组分质量在总质量中的占比代入式(2)中即可得到该二组分食品的平衡含水率,从而得到多组分食品的等温吸湿模型<sup>[15]8</sup>。多组分食品的等温吸湿方程:

$$X = f(a) X_a + f(b) X_b, \tag{2}$$

式中:

$X_a$  ——水分活度为  $a_w$  时  $a$  组分的含水率, g/g;

$X_b$  ——水分活度为  $a_w$  时  $b$  组分的含水率, g/g;

$X$  ——水分活度为  $a_w$  时混合食品的含水率, g/g;

$f(a)$  ——混合食品中  $a$  组分干物质的重量占总重量的百分比, %;

$f(b)$  ——混合食品中  $b$  组分干物质的重量占总重量的百分比, %。

米威化饼干由饼皮和馅料两种组分构成,则米威化饼干的吸湿特性模型由饼皮和馅料的吸湿特性模型得到。因此根据饼皮和馅料的等温吸湿特性模型可以得出米威化饼干的吸湿特性组合模型为(适用于水分活度介

于 0.35~0.90):

$$X = f(a) A_1 \left( \frac{1}{a_w} - 1 \right)^{(B_1-1)} + f(b) [A_2 (a_w)^{B_2} + C_2 (a_w)^{D_2}], \tag{3}$$

式中:

$X$  ——米威化饼干的含水率, g/g;

$a_w$  ——吸湿平衡时的水分活度, g/g;

$f(a)$  ——饼皮在米威化饼干中的质量百分比, %;

$f(b)$  ——馅料在米威化饼干中的质量百分比, %;

$A_1, B_1, A_2, B_2, C_2, D_2$  ——对应温度下的模型常数。

本试验采用的米威化饼干,  $f$ (饼皮)为 62.32%,  $f$ (馅料)为 37.68%。将通过拟合试验数据得到的模型常数分别对应于各温度下米威化饼干的吸湿特性模型中,即可得出该温度下米威化饼干的等温吸湿曲线。图 3 为 23 °C 饼干等温吸湿曲线。

依据米威化饼干平衡含水率的试验测定结果对所建

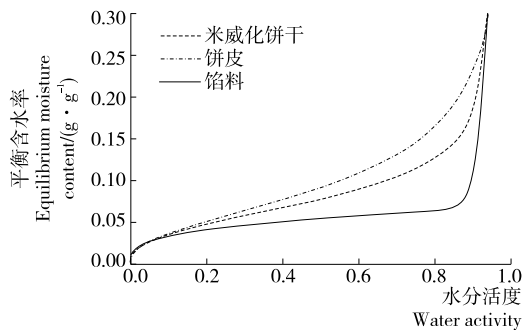


图 3 23 °C 饼皮/馅料/米威化饼干的等温吸湿曲线  
Figure 3 Predicted adsorption isotherm for bcrust, filling, rice made wafer at 23 °C

等温吸湿模型进行验证,结果如图 4 所示。结果表明,3 个温度的理论值与试验结果的吻合度高,23,30,45 °C 温度下三者相关系数分别为 0.974 8,0.978 7,0.997 0。

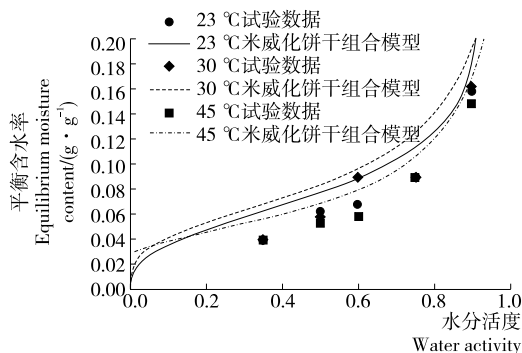


图 4 3 个温度下米威化饼干组合模型的等温吸湿曲线  
Figure 4 Predicted adsorption isotherm for rice made wafer at 3 temperatures

### 3 结论

研究表明在水分活度介于 0.35~0.90 时最适合表征饼干和馅料的等温吸湿模型分别是 Lewicki 模型和 Peleg 模型,并进一步推导得到米威化饼干双组分食品的等温吸湿组合模型;同时得出温度和相对湿度条件对饼干及馅料的平衡含水率均有一定影响,但相对湿度条件对吸附特性的影响更大。本试验仅对正常温度下米威化饼干的单组分进行了研究,没有进行低温度和高温的试验研究,这也将是继续进行研究的参考。

#### 参考文献

[1] LABUZA T P, KAREL S M. Mathematical models for optimization of flexible film packaging of foods for storage[J]. Transactions of the ASAE, 1972, 15(1): 150-155.  
 [2] 原琳, 卢立新. 酥性饼干防潮包装保质期预测模型的研究[J]. 食品工业科技, 2008, 29(10): 206-208.  
 [3] 刘珈羽, 方皓, 栗圣榕, 等. 枸杞子贮藏中平衡含水率变化规律及等温吸附曲线研究[J]. 食品科技, 2018, 43(1): 43-49.  
 [4] PRATHEEBA Y, SIMBARASHE S B, FRANK D B, et al. Moisture sorption isotherms and thermodynamic properties of whole black peppercorns (*Piper nigrum* L.)[J]. Food Science and Technology, 2015, 64(1): 177-188.  
 [5] 褚振辉, 卢立新. 韧性饼干的等温吸湿特性及模型表征[J]. 包装工程, 2011(3): 12-15.  
 [6] 王高杰, 刘妍, 曹思远, 等. 曲奇饼干等温吸湿规律及模型研究[J]. 食品科技, 2012, 37(12): 63-66.  
 [7] CHEN Ya-hui, LU Li-xin, WANG Jun. The theory of moisture migration of multi-component foods in packing systems and its applications[J]. Food Science, 2014, 35(17): 32-35.  
 [8] HAO Fa-yi, LU Li-xin, WANG Jun. Finite element simulation of shelf life prediction of moisture-sensitive crackers in

permeable packaging under different storage conditions[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2016, 40(1): 37-47.  
 [9] GUILLARD V, BROYART B, BONAZZI C, et al. Moisture diffusivity in sponge cake as related to porous structure evaluation and moisture content[J]. Journal of Food Science, 2006, 68(2): 555-562.  
 [10] PALOU E A, LÓPEZ-Malo, ARGAIZ A. Effect of temperature on the moisture sorption isotherms of some cookies and corn snacks[J]. Journal of Food Engineering, 1997, 31(1): 85-93.  
 [11] MCMINN W A M, MCKEE D J, MAGEE T R A. Moisture adsorption behaviour of oatmeal biscuit and oat flakes[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 79(2): 481-493.  
 [12] 李晓燕, 方健, 周韵致. 壳聚糖、纳米壳聚糖对聚乙烯醇膜结构与性能的影响[J]. 食品科学, 2017(17): 139-144.  
 [13] 彭飞, 赵琳, 王红英, 等. 乳清粉吸湿特性及其数学模型[J]. 饲料工业, 2015, 36(17): 31-37.  
 [14] AL-MUHTASEB A H, MCMINN W A M, MAGEE T R A. Moisture sorption isotherm characteristics of food products: A review[J]. Food & Bioproducts Processing, 2002, 80(2): 118-128.  
 [15] 褚振辉. 多组份食品的防潮包装研究: 双组份食品的货架期预测[D]. 无锡: 江南大学, 2011.  
 [16] MAROULIS Z B, TSAMI E, MARINOS-KOURIS D, et al. Application of the GAB model to the moisture sorption isotherms for dried fruits[J]. Journal of Food Engineering, 1988, 7(1): 63-78.  
 [17] 周鸿翔, 邹聪丽, 陈龙, 等. 核桃油微胶囊的形态结构及性能研究[J]. 中国油脂, 2016, 41(7): 43-47.  
 [18] PALIPANE K B, DRISCOLL R H. Moisture sorption characteristics of in-shell macadamia nuts[J]. Journal of Food Engineering, 1993, 18(1): 63-76.  
 [19] BLAHOVEC J, LAHODOVÁ, MAGDALENA. Moisture-induced changes of mass and dimension characteristics in some cereal grains[J]. International Agrophysics, 2015, 29(1): 1-12.  
 [20] 迟广俊, 郭鹏, 洪广峰, 等. 烟草样品等温吸湿模型的分析[J]. 中国烟草学报, 2017, 23(2): 50-58.  
 [21] LABUZA T P, HYMAN C R. Moisture migration and control in multi-domain foods[J]. Trends in Food Science & Technology, 1998, 9(2): 47-55.